

## 탄산염 성분이 포함된 사질토의 장기침하 예측

### Prediction of Long-Term Settlement of Sands Containing Carbonates

황웅기<sup>1)</sup>, Woongki Hwang, 이용수<sup>2)</sup>, Yongsu Lee, 황중호<sup>2)</sup>, Joongho Hwang, 김태형<sup>3)</sup>, Tae-Hyung Kim

<sup>1)</sup> 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

<sup>2)</sup> 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

<sup>3)</sup> 한국해양대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

**SYNOPSIS** : This study was conducted to propose the model that is able to predict long-term settlement of sands containing carbonates. We can observe that in addition to the initial elastic compression, a considerable additional compression occurs with long-term period in some sands. The compressibility of sands is significantly dependent on particle characteristics. Some sands have many pores and particularly has an angular shape. To predict of long-term settlement of these sands which contain carbonates, first of all a variety of tests which are to assess chemical, physical and compression characteristics of these sands were conducted. Second, in order to know settlement with time, the time parameter was determined by analyzing the measured data obtained from OO area. The measured settlement of this area shows that in addition to the initial elastic compression, a considerable additional compression occurring with time. It was caused by the crushing, shattering, and rearrangement of particles, which were real phenomena in sandy soils under loading condition. Based on this case study, we proposed that a simple method is able to predict settlement with time of sandy soil containing carbonates.

**Keywords** : Carbonate sand, Long-term settlement, Time parameter

## 1. 서론

일반적으로 모래지반은 즉시침하 즉, 탄성침하가 지배적인 것으로 알려져 있으나(Schmertmann et al., 1978; DeBeer, 1965; Meyerhof, 1974; Berardi et al., 1991; Lee and Salgado, 2002), OO 지역의 경우 구조물의 건설 이후 즉시침하 외에도 상당기간동안의 장기침하가 발생됨을 관찰할 수 있었다. 이는 이 지역의 모래가 일반적인 모래와 달리 탄산염을 상당량 포함하고 있기 때문으로 밝혀졌다. 이로 인해 모래지반의 탄성침하량을 산정하는 기존의 방식으로는 침하량 산정이 과소평가될 우려가 있으며, 특히 탄산염 성분을 함유한 모래의 장기침하를 예측하는 것은 어렵다. 따라서 탄산염 성분을 포함한 모래의 시간에 따른 장기 침하량을 예측할 수 있는 모델의 구축이 시급한 실정이다. 이를 위해 먼저 모래의 압축특성에 영향을 미치는 요인 중 특히 모래 자체가 가지고 있는 특성(입도, 입자크기, 입자형상, 조도, 광물경도 등)에 대해 살펴보고 시간 파라메타를 도입하여 시간에 따른 장기침하를 예측할 수 있는 모델을 제안하고자 한다.

## 2. 탄산염을 포함한 모래의 공학적 특성

### 2.1 화학적 특성

OO지역 모래의 화학적 특성을 살펴보기 위해 X-선 형광분석기(X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)와 X-선 회절분석기(X-Ray Diffractometer, XRD)를 이용하여 화학분석을 수행하였다. 그 결과 규산염을 약 40wt%, 탄산염을 약 51wt% 함유하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, XRD를 이용한 분석결과를 살펴보면 이 지역 모래를 이루고 있는 주요광물은 장석(Feldspar,  $(K,Na,Ca,Ba)(Al,Si)_4O_8$ )과 방해석(Calcite,  $CaCO_3$ ) 그리고 방비석(Analcime,  $NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$ )인 것으로 나타났다.

### 2.2 물리적 특성

모래의 물리적 특성을 살펴보기 위하여 비중시험과 입도분석시험을 실시한 결과 비중은 2.74로 나타났으며, 입경은 대체적으로 0.10 ~ 1.00mm의 범위에 속하고 통일분류법(Unified Soil Classification System, U.S.C.S.)으로 분류한 결과 입도 불량한 모래인 SP에 속하는 것으로 나타났다. 또한, 전계방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 통하여 모래 입자를 살펴보면 모래 입자의 형상이 모나고 기공이 발달하였으며 조개의 껍데기 등을 상당량 포함하고 있는 것으로 나타났다. 이는 모래가 탄산염 성분을 상당량 포함하고 있기 때문으로 판단되며, 이러한 모래의 입자 특성을 고려해 보면 모래 입자에 큰 하중이 작용할 때 기공과 약한 부분의 파쇄로 이어져 더 큰 침하를 발생시키는 원인이 될 것으로 판단된다.

### 2.3 압축특성

탄산염을 포함하고 있는 모래는 일반적인 모래와는 달리 장기 침하거동을 나타낼 것으로 판단된다. 따라서 모래의 침하특성을 분석하기 위해 압축시험을 수행하였고 그 결과로부터 선형압밀하중( $P_c$ )과 압축지수( $C_c$ )를 산정하였다.

#### 2.3.1 시험장비

본 연구에서는 모래의 압축시험을 수행하기 위해 압밀시험기를 이용하였다. 압축시험은 안지름이 60mm, 높이 20mm의 고정링형 압밀상자와 Scale effect를 고려하여 안지름이 104mm, 높이 34mm의 고정링형 압밀상자를 이용하여 수행되었다.

#### 2.3.2 시험결과

압축시험결과를 바탕으로 모래의 선형압밀압력( $P_c$ )과 압축지수( $C_c$ ) 값은 Table 1과 같이 나타났다. 또한, 모래의 압축시험 결과를 살펴본 결과, 압축시험시 하중 재하에 따른 압축뿐만 아니라 모래 입자의 파쇄로 인한 압축도 발생한 것으로 판단되었다. 따라서 모래의 파쇄특성을 알아보기 위해 압축시험 전·후의 입도분석을 수행한 결과, 압축시험 전과 비교하여 압축시험 후에 모래의 입경이 감소한 것으로 나타났다. 또한, 압축시험 전·후의 FE-SEM 촬영 결과, 압축시험 전의 모래의 입자가 대부분 불균질하고 기공이 많았던 것에 비해 압축시험 후에는 입자의 표면이 균질한 것으로 관찰되었다. 이 결과, 탄산염을 포함한 모래는 높은 응력 하에서 파쇄가 일어남을 알 수 있다.

Table 1. Compression test result of Jeju harbor sand

	Standard(Dr=50%)	Large(Dr=50%)	Large(Dr=75%)
$P_c(t/m^2)$	37	40	40
$C_c$	0.199	0.226	0.116

### 3. 탄산염 성분이 포함된 사질토의 장기침하 예측

#### 3.1 압축침하량 기본 모델

탄산염 성분을 포함한 사질토 지반의 압축특성을 파악하기 위해 압축시험을 수행하였고 그로부터 압력-간극비 곡선을 도출하였으며  $C_c$  값을 결정하였다. 압축시험결과로부터 얻어진 Fig. 1과 같은 압력-간극비 곡선에서 직선부의 기울기를 압축지수(compression index)  $C_c$  라고 한다.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} = \frac{\Delta e}{\log(p_2/p_1)} \quad (1)$$

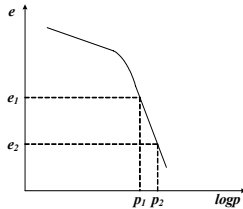


Fig. 1  $e - \log p$  curve

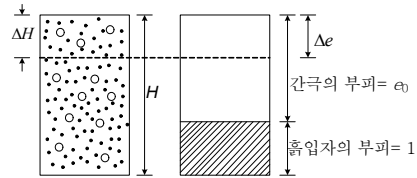


Fig. 2 Calculation of compression settlement

또한, 압축침하량의 계산 원리는 Fig. 2에서 설명할 수 있다. 전체 두께  $H$ 인 모래층의 유효연직압력이  $p_0$ 에서  $p_1$ 까지  $\Delta p$ 만큼 증가할 때 발생하는 압밀침하량을  $\Delta H$ 라고 하면 변형률은  $\epsilon = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e}$  으로 나타낼 수 있다. 따라서 최종압축침하량  $S_c$ 는 다음과 같이 된다.

$$S_c = \Delta H = \epsilon H = \frac{\Delta e H}{1+e_0} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\Delta e$ 는 식 (1)을 이용하여 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta e = C_c \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (3)$$

또한, 식 (3)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta P}{p_0} \quad (4)$$

따라서 식 (4)을 이용하여 모래의 최종압축예측침하량( $S_c$ )을 구할 수 있다. 하지만 이 식으로는 시간의 경과에 따른 지반의 침하량을 추정할 수 없다는 단점이 있다.

## 3.2 시간 파라메타 $C_t$

### 3.2.1 시간 파라메타 $C_t$ 의 기본 개념

시간에 따른 침하량을 예측하기 위해 식 (4)에 곱해지는 요소를 시간 파라메타( $C_t$ )라 한다. 그리고 시간에 따른 예측침하량을  $S_{ct}$ 라고 하면,

$$S_{ct} = C_t \cdot S_c \quad (5)$$

이고, 시간 파라메타( $C_t$ )는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_t = \frac{S_{ct}}{S_c} \quad (6)$$

또한, 우리가 미리 예측하고자하는  $S_{ct}$ (시간에 따른 예측침하량)와 실제 현장에서의 계측을 통한  $S_m$ (시간에 따른 계측침하량)은 동일해야 한다. 즉,

$$S_{ct} = S_m \quad (7)$$

그러므로 시간 파라메타( $C_t$ )는 아래와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$C_t = \frac{S_m}{S_c} \quad (8)$$

여기서,  $C_t$  = 시간 파라메타;  $S_{ct}$  = 시간에 따른 예측침하량;  $S_m$  = 현장에서 얻어진 시간에 따른 계측침하량;  $S_c$  = 최종압축예측침하량.

지반의 침하량을 시간에 따라 구분해 보면 재하 후 초기에는 시간에 따른 침하량의 정도가 크지만 시간이 경과함에 따라 점차 그 크기가 감소하다가 어느 정도 시간이 경과한 후에는 일정 값에 수렴하는 경향을 나타낸다. 그러므로  $C_t$ 를 다음과 같은 로그의 함수로 가정하였다.

$$C_t = \beta_0 + \beta_1 \log\left(\frac{t}{0.1 \cdot t_R}\right) \quad (9)$$

여기서,  $t$  = 시간;  $t_R$  = 참조시간  
또한,

$$\log\left(\frac{t}{0.1 \cdot t_R}\right) = x \quad (10)$$

라 놓으면 식 (9)은 아래와 같은 식 (11)으로 나타낼 수 있다.

$$C_t = \beta_0 + \beta_1 x \quad (11)$$

여기서,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  은 단순선형회귀모형계수이다.

### 3.2.2 시간 파라메타 $C_t$ 의 결정

압축시험결과인 압축지수( $C_c$ )값을 이용해 산정된 최종압축예측침하량( $S_c$ )과 실제 현장의 시간에 따른 예측침하량( $S_m$ )을 통해 시간파라메타( $C_t$ )와  $x$ 를 도출하여 그 데이터로부터  $x$ 와  $C_t$ 에 관한 회귀 분석을 통해 식 (11)의 단순선형회귀모형계수를 추정하였다. 그 결과  $C_t$ 의 회귀모형계수  $\beta_0$ 는 0.62로  $\beta_1$ 은 0.40으로 추정되었다.

여기서 결정한 시간파라메타( $C_t$ )와 식 (4) 및 식 (5)을 이용하여 시간에 따른 예측침하량을 산정하여 현장의 시간에 따른 예측침하량과 비교하였다.

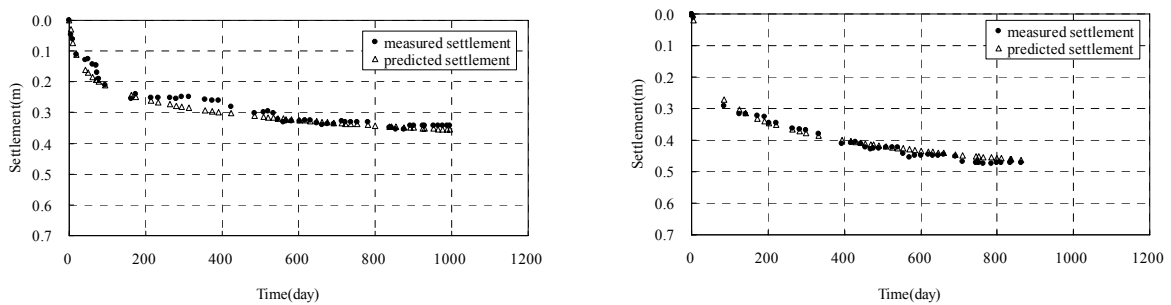


Fig. 3 Comparison predicted with measured settlement

Fig. 3은 시간-예측침하량 곡선과 시간-계측침하량 곡선의 비교를 나타낸다. 시간-예측침하량 곡선과 시간-계측침하량 곡선의 비교를 살펴보면 두 곡선이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이상과 같은 결과를 종합해 보면 탄산염을 약 50% 정도 포함하고 있는 사질토지반의 시간에 따른 침하량을 예측하기 위한 모델은 다음과 같다.

$$S_{ct} = C_t \frac{C_c}{1+e_0} H_s \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

$$C_t = 0.62 + 0.4 \log \left( \frac{t}{0.1 \cdot t_R} \right)$$

여기서,  $S_{ct}$  = 시간에 따른 예측침하량;  $C_c$  = 압축지수;  $H_s$  = 모래층 두께;  $e_0$  = 모래층의 초기 간극비;  $P_0$  = 모래층 중앙의 초기 유효연직압력;  $\Delta P$  = 유효연직압력의 증가량;  $C_t$  = 시간 파라메타;  $t$  = 시간(day);  $t_R$  = 참조 시간 = 3year = 1095days.

## 4. 결론

1. 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM)을 통하여 탄산염 성분이 포함된 사질토의 입자 표면 특징을 살펴본 결과 입자의 형상이 모나고 기공이 발달한 특징을 나타냈으며 조개의 껍데기 등을 상당량 포함하고 있는 것으로 나타났다.
2. 압축시험결과 탄산염 성분이 포함된 사질토는 즉시 침하뿐만 아니라 모래 입자의 파쇄와 재배열로 인한 장기침하 현상을 나타냈다.

3. 탄산염 성분이 포함된 사질토 지반의 시간에 따른 장기침하량을 예측하기 위해서는 압축시험과 시간 파라메타( $C_v$ )를 고려하여 본 연구에서 제안한 방법을 이용하는 것이 모래의 재배열과 파쇄로 인한 장기침하를 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Berardi, R., Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R.(1991), "Settlement of Shallow Foundations in Sands Selection of Stiffness on the Basis of Penetration Resistance", Proc. of the Congress Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the ASCE, McLean, Campbell, and Harris, Eds., Vol. 1, Geotechnical Special Publication, No. 27, pp. 185-200.
2. DeBeer, E. E.(1965), "Bearing Capacity and Settlement of Shallow Foundations on Sand", Lecture No. 3, Proceeding of the Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, pp. 15-33.
3. Lee, J. and Salgado, R.(2002), "Estimation of Footing Settlement in Sand", International Journal of Geomechanics, Vol. 2, No. 1, pp. 1-28.
4. Meyerhof, G. G.(1974), "Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlaying Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 224-229.
5. Schmertmann, J. H., Hartman, J. P. and Broun, P. R.(1978), "Improved Strain Influence Factor Diagrams", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. 8, pp. 1131-1135.